

УДК 621.398.725:621.317.727.1

## АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИСПЫТАНИЙ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Заревич А.И., Муравьев С.В., Бедарева Е.В., Баранов П.Ф., Сарычев С.В.

Томский политехнический университет

E-mail: antonzarevich@ngs.ru

Рассмотрен аппаратно-программный комплекс, предназначенный для автоматизированных испытаний сильноточных преобразователей. В состав комплекса входят: формирователь импульсного тока, эталонный трансформатор тока, регистрирующее и коммутационное оборудование, а также программное обеспечение, осуществляющее управление работой комплекса и обработку результатов измерений. Экспериментальное апробирование комплекса проведено на примере сильноточных токовых шунтов, для которых определялись частотные зависимости импеданса. Показано, что применение комплекса позволит оперативно определять динамические метрологические характеристики компонентов и элементной базы силовой электроники.

### Ключевые слова:

Источник импульсного тока, токовый шунт, динамические характеристики, преобразование Фурье, автоматизация испытаний.

### Key words:

Pulse current source, current shunt, dynamic behaviour, Fourier transform, test automation.

### Введение

В современных технологических процессах типичной задачей является измерение больших импульсных токов различной формы. Подобные задачи возникают, например, при исследовании переходных режимов короткого замыкания. Для регистрации энергетических параметров данных сигналов необходимо иметь образцовые средства измерения, такие как широкополосные импульсные трансформаторы тока и токовые шунты, при этом максимальные значения измеряемого тока могут достигать 50 кА и более при длительности импульса несколько мс. Возможности организации испытаний подобных сильноточных преобразователей существенно ограничены из-за отсутствия выпускаемых серийно источников импульсных токов с необходимыми характеристиками [1], а существующие лабораторные образцы обладают большими габаритами и стоимостью. Таким образом, актуальна проблема разработки испытательного стенда, позволяющего исследовать динамическое поведение элементов энергетического оборудования с заданными метрологическими характеристиками [2].

В статье описан созданный аппаратно-программный комплекс для автоматизированных испытаний сильноточных преобразователей. Приведен его состав и основные технические характеристики. Практическая применимость комплекса продемонстрирована на примере определения частотной зависимости импеданса сильноточного токового шунта.

### Состав аппаратно-программного комплекса

Испытания сильноточного оборудования традиционно проходят на специализированных стендах, которые состоят из источника мощного импульсного сигнала, передающих линий, коммутационного оборудования и первичных электрических преобразователей [3, 4]. При этом в качестве

источника импульсного сигнала применяются различные варианты генераторов, основанных на предварительном накоплении энергии и последующем разряде накопителя на низкоомную нагрузку, обеспечивающие получение импульсов напряжением в сотни вольт и длительностью в десятки и сотни микросекунд [1]. Характерной особенностью таких генераторов является низкая амплитудная и временная стабильность импульсов. Эти факторы существенно усложняют прямые измерения характеристик тестируемого оборудования.

В созданном аппаратно-программном комплексе использован перспективный метод определения динамических характеристик, основанный на формировании короткого импульсного воздействия на исследуемый объект и последующей цифровой обработке входного сигнала и отклика на него [3, 5]. Входной и выходной сигналы объекта сохраняются в памяти ЭВМ, затем определяются их спектры. Динамические (амплитудно-частотная и фазочастотная) характеристики тестируемого объекта определяются по арифметическому отношению спектральных плотностей входного и выходного сигналов на соответствующих частотах [6].

Структурная схема комплекса приведена на рис. 1, а его внешний вид – на рис. 2.

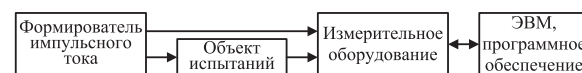


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса

В состав комплекса входят:

- формирователь импульсного тока;
- образцовые средства измерения;
- крейт PXI, производства компании National Instruments (США), включающий измерительное оборудование и ЭВМ;
- программное обеспечение для обработки результатов измерений и управления компонентами стенда;



Рис. 2. Аппаратно-программный комплекс для автоматизированных испытаний силовых преобразователей

- комплект кабельного и коммутационного оборудования.

Основные технические характеристики комплекса:

- амплитуда импульса тока ..... не более 50 кА;
- длительность фронта импульса тока ..... ~14 мкс;
- длительность импульса по уровню –10 дБ ..... ~160 мкс;
- частота следования импульсов ..... не более 0,1 Гц;
- диапазон частот ..... от 1 кГц до 2 МГц;
- погрешность метода измерения тока ..... не более 0,1 %;
- габаритные размеры (ширина×глубина×высота) .. 480×475×300 мм;
- масса ..... не более 30 кг.

Программное обеспечение комплекса предназначено для расчета и построения амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик исследуемого объекта по измеренным мгновенным значениям его входных и выходных сигналов. Программное обеспечение разработано в среде графического программирования LabVIEW и представляет собой три независимых программы – виртуальных прибора:

- Регистратор PXI;
- Конвертор данных;
- Анализатор сигналов.

Программа «Регистратор PXI» предназначена для измерения мгновенных значений сигналов на выходах исследуемого силовоточного преобразователя и эталонного трансформатора тока. «Конвертор данных» предназначен для просмотра и преобразования различных форматов, измеренных данных в один унифицированный формат.

«Анализатор сигналов» предназначен для расчета зависимостей от частоты модуля и аргумента импеданса преобразователей по измеренным мгновенным значениям сигналов на их входе и выходе.

#### Формирователь импульсного тока

Упрощенная электрическая принципиальная схема формирователя импульсного тока представлена на рис. 3. На схеме не приведены элементы управления, блоки индикации состояний стенда, контроля нагрузки, стабилизации напряжения, коммутации и питания элементов управления. Все силовоточные элементы стенда размещены в металлическом корпусе. Элементы коммутации и управления, а также выходы сигналов смонтированы на передней панели корпуса.

Накопитель энергии  $C$  выполнен как батарея из восьми конденсаторов марки K75–40а ёмкостью 100 мкФ каждый. Заряд накопителя производится напряжением с выхода сетевого трансформатора  $T1$  (марка TA100) и диодного выпрямителя  $VD$  (марка W10M). Ток заряда батареи ограничен балластным резистором  $R1$  сопротивлением 10 кОм (марка C5–35B 100). Съём тока с накопителя производится двумя токосъёмными пластинами, подключенными к выходным токоведущим шинам.

Исследуемый объект (силовоточный преобразователь)  $Z_n$  является нагрузкой формирователя импульсного тока и подключается к токоведущим шинам посредством сопрягающих токоведущих пластин и клемм  $XI1$ . Газоразрядное устройство марки CITEL BF P100 закреплено в верхней токоведущей шине на специальных контактных стойках-держателях. Измерительная информация берётся с коаксиального выхода  $XW1$  эталонного трансформатора тока  $T2$  марки 13W0100 и выхода исследуемого объекта.

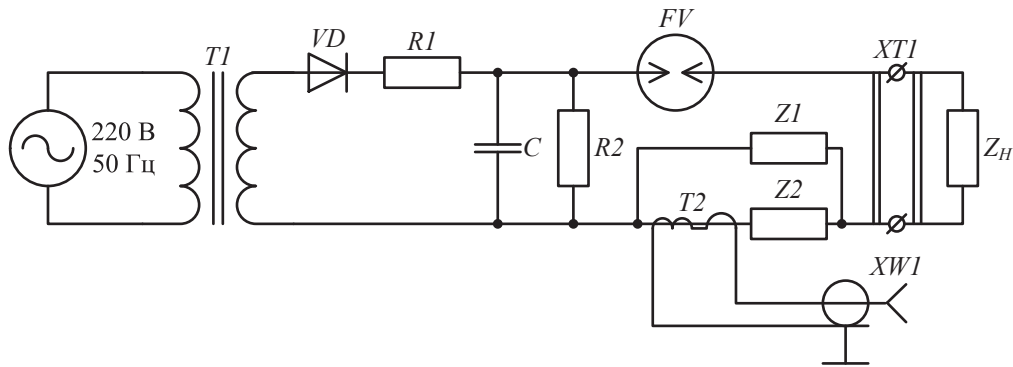


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема формирователя импульсного тока

Работа высоковольтной части стенда контролируется блоком контроля нагрузки. При отсутствии подключенной нагрузки блок отключает цепи заряда накопителя энергии. Принудительный разряд накопителя при отключении питания стенда или нарушении контакта с исследуемым объектом производится через резистор  $R2$  сопротивлением 2,7 кОм.

Токосъемные пластины выполнены из листовой меди толщиной 0,8 мм. Токоведущие шины — из медных полос сечением 40×5 мм. Соединение пластин и шин выполнено по плоско-параллельной конфигурации, позволяющей минимизировать индуктивность и активное сопротивление токоведущей части источника, которые составили 210 нГн и 250 мкОм соответственно. Внешний вид токоведущей части формирователя представлен на рис. 4.

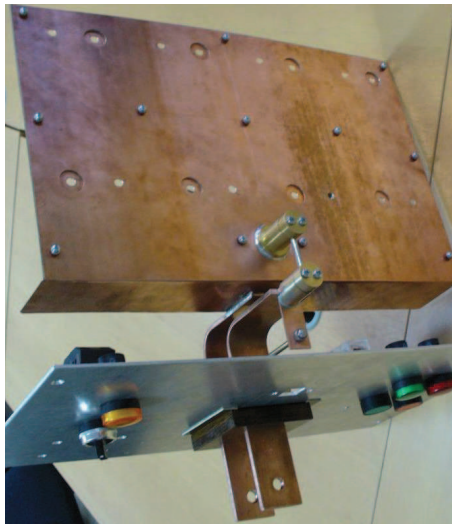


Рис. 4. Токоведущая часть формирователя импульсного тока

Напряжение заряда накопителя ограничено напряжением пробоя газоразрядного устройства и составляет порядка  $350 \pm 6$  В. Внутреннее сопротивление разрядника в состоянии покоя превышает 1 ГОм. В состоянии короткого замыкания его внутреннее сопротивление падает до значения  $\sim 0,1$  Ом. Время срабатывания разрядника, заявленное производителем, составляет единицы нано-

секунд. Это значение существенно меньше характерных времён переходных импульсных процессов в стенде.

Поскольку динамический диапазон образцового трансформатора тока 13W0100 ограничен значением 5 кА, ток на него поступает через делитель тока, обозначенный на рис. 3 импедансами  $Z1$  и  $Z2$ . Делитель реализован в виде токоотвода (импеданс  $Z2$ ), пропущенного через отверстие трансформатора, и отрезка токоведущей шины (импеданс  $Z1$ ). Коэффициент деления делителя, определенный в ходе предварительных экспериментов, составил 1/17. Это значение учитывается при первичной обработке экспериментальных данных.

#### Программное обеспечение комплекса

Программное обеспечение (ПО) комплекса запускает формирователь импульсного тока, который генерирует импульс, поступающий на исследуемый объект и эталонный трансформатор тока. Выходные сигналы объекта  $y(t)$  и эталонного трансформатора тока  $x(t)$  поступают на входы крейта РХ1, измеряются цифровым двухканальным осциллографом с разрядностью 12 бит и сохраняются в памяти ЭВМ. Над полученными данными выполняется быстрое преобразование Фурье, в результате чего получается вектор комплексных чисел, соответствующих спектральному составу образуемых сигналов тока трансформатора  $G_y(f)$  и напряжения шунта  $G_x(f)$ . Комплексный коэффициент передачи исследуемого объекта  $Z_n(f)$  определяется по выражению [7]:

$$Z_n(f) = G_y(f) / G_x(f).$$

Зависимость модуля комплексного коэффициента передачи от частоты представляет собой амплитудно-частотную характеристику исследуемого объекта, а ее аргумент — фазочастотную характеристику.

Программное обеспечение реализует следующие функции:

- регистрация сигналов;
- сохранение сигналов на жесткий диск ЭВМ в формате табличных данных;
- конвертация табличных данных во внутренний числовой формат LabVIEW;
- временной анализ данных;

- спектральный анализ данных;
- спектральное усреднение данных;
- расчет амплитудно- и фазочастотной характеристик исследуемого объекта

Регистрация и графическое представление мгновенных значений токов с шунта и образцового трансформатора тока осуществляется с помощью программы виртуального осциллографа, который позволяет формировать параметры проведения эксперимента, управления осциллографом РХИ-5122, сохранения данных, а также графически представлять результаты эксперимента на экране монитора компьютера в реальном времени.

Исследователь может проводить измерения мгновенных значений тока, используя в качестве регистратора различные типы осциллографов или плат сбора данных. «Конвертор данных» позволяет производить перезапись мгновенных значений токов, измеренных регистратором с возможностью смены масштаба осей.

Для определения частотной зависимости импеданса силовых преобразователей разработан программный модуль «Анализатор сигналов». Эта программа предназначена для нормировки и графического представления измеренных мгновенных значений токов с шунта и образцового трансформатора, фильтрации измерительной информации для удаления высокочастотного шума, а также для вычисления амплитудного спектра сигнала с шунта и образцового трансформатора. На основе этих данных анализатор рассчитывает импеданс и определяет верхнюю граничную частоту шунта.

Модули программного обеспечения позволяют проводить измерение и обработку информации в автоматизированном режиме, что уменьшает временные затраты на проведение испытаний силовых преобразователей, а также позволяет повысить их достоверность.

#### Тестовые испытания комплекса

Объектом тестовых испытаний комплекса был выбран коаксиальный шунт, рассчитанный на номинальный ток 20 кА. На рис. 5 представлены ос-

циллограммы наблюдаемых сигналов, полученные с помощью регистратора сигналов.

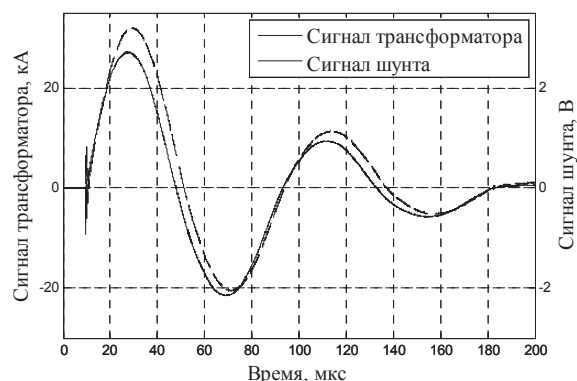


Рис. 5. Осциллограммы выходных сигналов эталонного трансформатора тока и исследуемого шунта

Конвертация данных и их временной анализ позволили синхронизировать сигналы по времени начала импульса и повысить разрядность исходных данных. Расчет и построение амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик производились программным модулем «Анализатор сигналов», результаты работы которого приведены на рис. 6.

Из приведенных характеристик видно, что в диапазоне частот до 100 кГц шунт имеет линейный коэффициент передачи по амплитуде, при этом модуль импеданса  $|Z_{ш}|$  составляет порядка 160 мкОм. Кривая аргумента импеданса при этом имеет равномерный спад, характерный для электрических цепей первого порядка. На более высоких частотах поведение шунта имеет сложный характер, не поддающийся описанию в рамках линейной модели, что приводит к росту погрешности. Также рост погрешности при увеличении частоты связан с резонансными явлениями в соединительных проводах и шумами в использованном оборудовании. Измерения, проводимые на этих частотах, будут приводить к некорректным результатам.

Полученные в данном тестировании данные согласуются с теоретическими результатами моделирования шунта [8, 9].

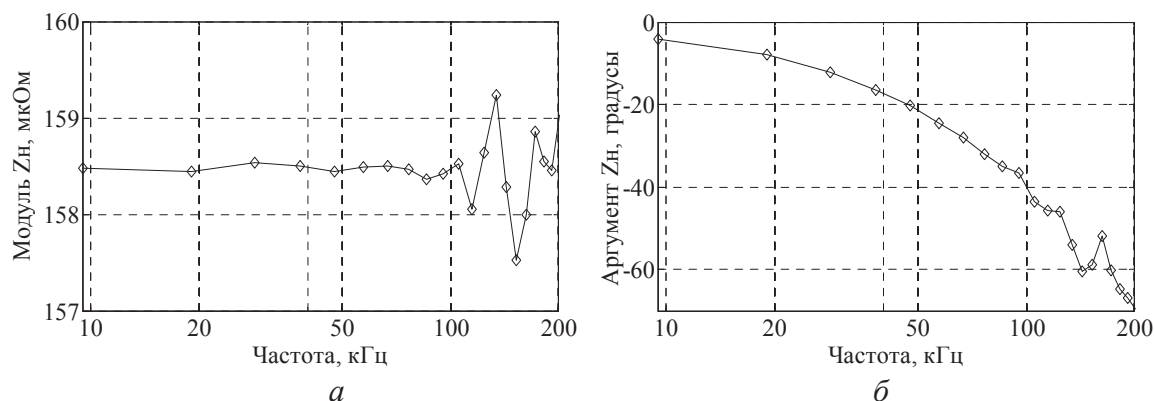


Рис. 6. Результаты определения импеданса шунта: а) модуль; б) аргумент



## Выводы

Создан и экспериментально апробирован аппаратно-программный комплекс, позволяющий в автоматизированном режиме получать частотные зависимости импедансов сильноточных токовых преобразователей. В комплексе использован перспективный метод определения динамических характеристик, основанный на формировании короткого импульсного воздействия на исследуемый объект и последующей цифровой обработке входного сигнала и отклика на него. Работоспособность комплекса продемонстрирована при определении характеристик токового шунта, рассчитан-

ного на номинальный ток 20 кА. Полученные результаты соответствуют заложенным при проектировании шунта характеристикам.

Использование комплекса позволит существенно ускорить процесс испытания оборудования силовой электроники. Относительно малые габариты и низкое энергопотребление компонентов комплекса позволяют включать его в состав мобильных испытательных лабораторий.

*Исследования выполнены в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработка по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 гг.» (государственный контракт № 11.519.11.6026).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. — М.: Наука, 2004. — 704 с.
2. Болотин И.Б., Эйдель Л.З. Измерения при испытании аппаратов в режимах короткого замыкания. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1988. — 200 с.
3. Cherbaucich C., Crotti G., Kuljaca N., Novo M. Evaluation of the dynamic behaviour of heavy current shunts // Metrology in the 3<sup>rd</sup> Millennium: Proc. of the XVII IMEKO World Congress. — Dubrovnik, Croatia, June 22–27 2003. — P. 586–589.
4. Kawamura T., Haginomori E., Goda Y., Nakamoto T. Recent Developments on High Current Measurement Using Current Shunt // Transactions on electrical and electronic engineering. — 2007. — № 2. — P. 516–522.
5. Глебович Г.В., Андриянов В.А., Введенский Ю.В. и др. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов. — М.: Радио и связь, 1984. — 256 с.
6. Заревич А.И., Муравьев С.В., Бедарева Е.В., Величко О.Н. Цифровая обработка импульсных сигналов для определения частотных характеристик преобразователей тока // Известия Томского политехнического университета. — 2012. — Т. 320. — № 5. — С. 116–120.
7. Заревич А.И., Муравьев С.В., Бедарева Е.В., Карпенко С.Р. Импульсный метод определения частотных характеристик сильноточных шунтов // Известия Томского политехнического университета. — 2012. — Т. 321. — № 4. — С. 137–140.
8. Векслер М.С., Теплинский А.М. Шунты переменного тока. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 120 с.
9. Muravyov S.V., Borikov V.N., Natalinova N.M. A computer system: measurement of welding surge currents // Measurement and Control. — 2009. — V. 42. — № 3. — P. 44–47.

*Поступила 20.03.2013 г.*